



TITLE:

Evaluation on mechanical properties of
micro/nano-meter scale materials by
resonant vibration(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Fang, Hui

CITATION:

Fang, Hui. Evaluation on mechanical properties of micro/nano-meter scale materials by resonant vibration. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r13008>

RIGHT:

許諾条件により本文は2017-01-01に公開

京都大学	博士（工 学）	氏名	方 輝（Fang Hui）
論文題目	Evaluation on mechanical properties of micro/nano-meter scale materials by resonant vibration (共振を用いたマイクロ/ナノスケール材料の機械的特性の評価)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>微小デバイスの信頼性を高めるためには、その構成要素であるマイクロ/ナノスケールの微小材料の機械的特性を理解する必要がある。一方、微小材料の機械特性評価試験には困難があり、その特性は体系的には明らかになっていない。本論文は、マイクロ/ナノスケールの微小材料の機械特性を実験的に明らかにすることを目的として共振を用いた新しい試験手法を開発し、ナノスケールの要素で構成された複雑構造材料に特有な変形特性およびマイクロスケールの金属材料の疲労挙動について研究した成果をまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は緒論であり、研究の背景および本論文の目的を述べている。微小デバイスに関連してマイクロ/ナノスケール材料の機械的特性の工業的重要性を指摘した後、現在までに行われてきた微小材料を対象とする機械特性試験法をレビューするとともに、その長短を説明している。従来の試験での困難を克服する方法として共振現象が利用できることを指摘し、複雑な構造を有する微小材料特有の弾性変形特性や微小金属材料の高サイクル疲労損傷特性の解明のための有力な方法となり得ることを述べている。これらの材料特性解明には高度な実験方法が必要であることを示した上で、本研究の目的を明確にしている。</p> <p>第2章は、複雑構造を有する微小材料の弾性変形特性を共振によって評価する方法を開発し、無数のナノスケールのスプリング要素が集合した薄膜へ本手法を適用することを試みている。ナノ構造体は、その構造寸法に起因して極めて高い共振周波数を有している。その周波数は通常は測定機器の測定限界能力を超えることから、共振特性の評価ができない。そこで、共振周波数を低減するため、対象材料から作製したブロック型試験片に対して試験片端部にマイクロサイズの錘を搭載することを提案している。最新の加工技術を用いて提案試験片を精密に作製できることを示し、振動試験よりその共振特性を特定することに成功している。また、複雑構造を有する微小材料特有の機械的性質として、負荷方向によって大きく変形特性が異なる変形異方性を有することが挙げられる。振動源に対する同試験片の取り付け方を工夫して複数の方向への共振試験を行うことで、それぞれの方向の変形に対応する共振特性を求めることに成功している。さらに、有限要素法を用いた振動解析に基づく逆解析手法によって、ナノスケールの複雑構造薄膜の異方性を含む変形特性を精密に評価できることを示している。開発された手法は、直接負荷が困難であるマイクロ/ナノ材料の変形特性の評価に関して有用である。</p> <p>第3章は、ミクロンまたはサブミクロン寸法の微小金属材料を対象とした両振り高サイクル疲労強度評価試験を実現するために共振を利用する方法を提案している。共振周波数低減のためにカンチレバーの先端に錘を配置した独自の試験片形状を設計し、同形状を有するマイクロサイズの金単結晶カンチレバー試験片を作製するとともに、試験片固有の共振周波数の振動によって試験片に制御された両振りの繰り返し変</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	方 輝（Fang Hui）
<p>形を与えることができるのを確認している。同手法を用いて単一すべり方位を有する金単結晶カンチレバー試験片に対する高サイクル疲労試験を実施し、マイクロサイズの金属でもバルク材に発生するものに類似した疲労損傷（突き出し/入り込み）が最大のせん断応力となるすべり面に生じることを見出している。一方、その突き出し/入り込みの寸法および形成応力は、繰り返し変形を受けたバルク材のそれらとは大きく異なり、その損傷メカニズムにはバルク材料と相違があることを発見している。続いて寸法の異なるマイクロ～サブマイクロサイズの金単結晶試験片を複数用意して高サイクル疲労試験を行い、材料寸法が小さくなるとともに突き出し/入り込みの寸法は縮小する一方、形成応力は増加することを明らかにしている。すなわち、損傷メカニズムに寸法効果が存在することを示している。さらに、マイクロ金属材料の疲労強度は、バルク材のそれより格段に高いことを述べている。このように工夫した共振疲労試験方法を提案し、現在まで未解明であった微小材料の疲労損傷過程を明らかにしたことに本研究の特徴がある。</p> <p>第4章は、第3章で開発した共振疲労試験手法を用いて、実用上で重要な積層膜中における多結晶金属薄膜の高サイクル疲労強度およびその損傷機構について実験的研究を行っている。シリコン基板上に多結晶銅薄膜と窒化シリコン膜を順次形成した積層材料から試験片を切り出し、その先端に共振周波数低減のための錘を取り付けることで、異材接合材料に対する両振り高サイクル疲労試験に成功している。積層膜中で最も降伏応力の低い多結晶銅薄膜内において、特定の結晶粒にのみナノサイズの突き出し/入り込みの疲労損傷が現れることを発見している。この原因を明らかにするために、各結晶粒の形状および結晶方位を特定し、それぞれの結晶粒の形状、結晶方位および変形異方性を考慮した有限要素法解析を行っている。この解析によって多結晶銅薄膜に生じている微視的応力状態を正確に解明し、力学的な影響によって特定の結晶粒にのみ疲労損傷が生じていることを明らかにしている。また、その突き出し/入り込みは、周囲の変形拘束等の影響によって本試験片中でせん断応力が最大となるすべり系に発生していることを発見している。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、マイクロ/ナノ材料の機械特性を明らかにするために、共振を用いた新しい試験手法を開発し、ナノ要素で構成された材料の変形異方性およびマイクロ金属材料の疲労挙動について研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 複雑な構造を有する薄膜の弾性変形評価法を開発している。共振周波数低減のための錘を搭載したブロック型試験片を提案し、無数のナノ・スプリング要素が集めた薄膜材料に対して精密に作製している。さらに、同試験片に対して異なる方向への振動実験を行い、その共振特性の相違を利用して逆解析的に薄膜の顕著な変形異方性を明らかにすることに成功している。開発された手法は、直接負荷が困難である一般のマイクロ/ナノ材料の複雑な変形特性評価に有用である。

(2) 微小金属材料の両振り高サイクル疲労試験法の開発を対象としている。単一すべり方位を有するマイクロサイズの金単結晶カンチレバー試験片を作製するとともに、共振を利用して繰り返し変形を与える試験法を提案している。さらに、同法を用いた疲労試験より、マイクロサイズの金属ではバルク材表面に発生する損傷と類似した損傷（突き出し/入り込み）を生じるが、その寸法および形成応力は大きく異なり、その損傷メカニズムに相違があることを発見している。さらに、寸法の異なるマイクロサイズの複数試験片の疲労試験を行い、材料寸法が小さくなるとともに突き出し/入り込みの寸法は縮小し、その形成応力が増加する寸法効果が存在することを示している。現在まで未解明であった微小寸法の疲労損傷過程を明らかにしたことに本研究の特徴がある。

(3) シリコン基板上に多結晶銅薄膜および窒化シリコン層が成膜された積層材料からカンチレバー試験片を切り出し、(2)の開発手法によって異材接合材料に対する疲労試験に成功している。銅薄膜内の特定結晶粒内にナノサイズの疲労損傷が生じることを示し、微視組織を考慮した力学解析によって、すべり面上に形成された損傷の機構を解明している。

本論文は、ナノ/マイクロ材料の機械特性を共振振動実験と力学解析に基づいて検討してその詳細を解明したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 1 月 19 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。